

Class 1000 클린룸에서 편류 개선에 관한 연구

노광철, 이승철^{*†}

연세대학교 기계공학부, ^{*}강원대학교 소방방재학부

A Study on the Improvement of Airflow Deflection in a Cleanroom of Class 1000

Kwang-Chul Noh, Seung-Chul Lee^{*†}

Department of Mechanical Engineering, Yeonse University, Seoul 120-700, Korea

^{}Division of Fire and Disaster Prevention, Kangwon National University, Kangwon 245-711, Korea*

(Received January 28, 2010; revision received March 15, 2010)

ABSTRACT: We performed 3-dimensional numerical study on the improvement of the airflow deflection in the cleanroom of Class 1000, which is presently operated for the manufacturing process in Korea. The Deflection angle and the non-uniformity were investigated to analyze the airflow characteristics and the performance of cleanroom with variations of the cleanroom occupancy state, the filters' arrangement, and the floor return air system. From the numerical results, we found out that the airflow pattern of the cleanroom is more unidirectional and stable in the condition of at-rest than in the condition of as-built. It is due to that the equipments installed in the cleanroom play a role like partitions, which prevent the airflow from inclining toward the recirculation air duct. And it is needed to arrange the filter units parallel to the equipments array without a gap between them for maintaining the unidirectional airflow pattern. Finally, we knew that it is very important to install the partition like the eyelid above the equipment to keep the unidirectional airflow around the equipments and remove the contaminants quickly.

Key words: Airflow Deflection(편류), Cleanroom(클린룸), Deflection Angle(편향각), Fan Filter Unit(팬필터유닛)

기 호 설 명

K : 투과율 [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}^2$]
 NU : 비균일도
 P : 압력 [N/m^2]
 u : 속도 [m/s]

그리스 문자

ρ : 밀도 [kg/m^3]

α : 압력강하특성계수 I
 β : 압력강하특성계수 II
 θ : 편향각 [$^\circ$]

하첨자

i : 방향지표
 in : 입구

1. 서 론

[†] Corresponding author

Tel.: +82-33-570-6815; fax: +82-33-570-6819

E-mail address: sclee@kangwon.ac.kr

GIGA급 클린룸 시대의 도래로 인하여 클린룸 내부에서의 오염은 입자뿐만 아니라 가스상 오염(airborne

molecular contamination)이 더욱 심각한 문제로 대두되고 있지만 대부분의 전자부품 제조공정에서의 클린룸은 제품에 영향을 미치는 이물질(foreign material)의 크기에 따라 Class 100~Class 10,000에서 운영되고 있다. 최근에 들어서는 에너지 절약과 생산비용의 절감을 이유로 가공점에서 제품을 보호하는 국소환경시스템(mini-environment system)을 많이 사용하게 되고 있어 클린룸 대공간은 Class 1,000으로 유지되어 운영되고 있는 실정이다. 따라서 Class 1,000 청정도를 갖는 클린룸에서의 기류는 오염제어의 관점에서 매우 중요하다고 볼 수 있다. 이러한 Class 1,000 클린룸은 시간당 환기회수가 50~70회 정도로서 이전까지는 난류형 클린룸(turbulent type cleanroom)으로 분류되어 사용되어 왔으나 최근에는 수직층류형 클린룸(vertical laminar type cleanroom)의 형태로 관리되고 있다.

클린룸과 같은 고청정 대공간에서 편류에 대한 영향은 클린룸 특성상 실제적인 평가가 어렵기 때문에 전산유체역학(CFD) 기법을 이용하여 기류 및 편향각 등에 대한 연구들이 많이 수행되어 왔다.⁽¹⁻⁶⁾ 국내에서는 MEGA급 클린룸 내에서의 2차원 유동 및 오염입자의 확산특성, 난류모델들에 대한 평가 등의 연구가 수행되었고,^(4,6) 최근 들어 수퍼클린룸에서 3차원 기류 및 동적교차오염 특성에 대한 분석 연구가 수행되었다.⁽³⁾ 국외에서는 일방향성 유동의 초청정 클린룸시스템에서 클린룸 공조방식과 크기에 따른 유동 및 환기특성 등을 2차원적으로 해석하고 그 결과를 비교, 분석한 연구가 수행되었고, GIGA급 국소환경 시스템(mini-environment system)의 사용이 증가함에 따라 클린룸의 작업영역에서 국소환경 내부와 주위에서의 유동 및 압력 특성 등

에 관한 연구들이 수행되고 있다.⁽⁷⁻⁹⁾ 그러나 이상의 연구에서는 클린룸에 관한 대부분의 수치적 연구들이 2차원만을 고려하여 3차원 효과에 대한 영향을 평가하지 않았고 특히 전자부품을 제조하는 클린룸에서 많이 사용되고 있는 Class 1,000 클린룸에서의 편류 특성에 대한 평가는 거의 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 Class 1000의 청정도로 운영되고 있는 클린룸에 대해서 전산유체역학 기법을 도입하여 3차원 기류 해석을 수행하였다. 클린룸에서 장비 유무에 따른 점유상태, 필터와 다공패널의 배치, 하부플레넘의 높이 등을 변수로 하고 평가지표로서 편향각과 기류 균일도를 사용하여 편류 개선에 대한 연구를 수행하였다.

2. 클린룸 모델

클린룸 공장은 생산수율과 사이클 타임(cycle time)에 대한 성능요구 사항을 만족시킬 수 있도록 설계가 이루어진다. 따라서 각 공정마다 클린룸 내부의 형태가 다르고 청정도 등급에 대한 기준치가 다르게 된다. 본 연구에서는 국내에서 많이 사용되는 Class 1,000 클린룸을 모델로 설정하였다. Fig. 1은 본 연구에서 사용된 Class 1,000 클린룸 시스템의 한 모델을 나타낸 것이다. 편류의 개선을 위하여 실제 적용되고 있는 모델에서 장비의 상부에 파티션을 추가한 것이다. 전체적인 공조방식은 상부 플레넘에서 팬필터유닛(Fan Filter Unit, FFU)이나 송풍식 필터유닛(Blower Filter Unit, BFU)을 사용하여 공기를 순환시키는 방식이다. 클린룸 크기는 18.0 m(x) × 4.0 m(y) × 7.2 m(z)으로 전체 클린룸이 y-z축 단면을 중심으로 대칭이기 때문에 전체크기의 절반을

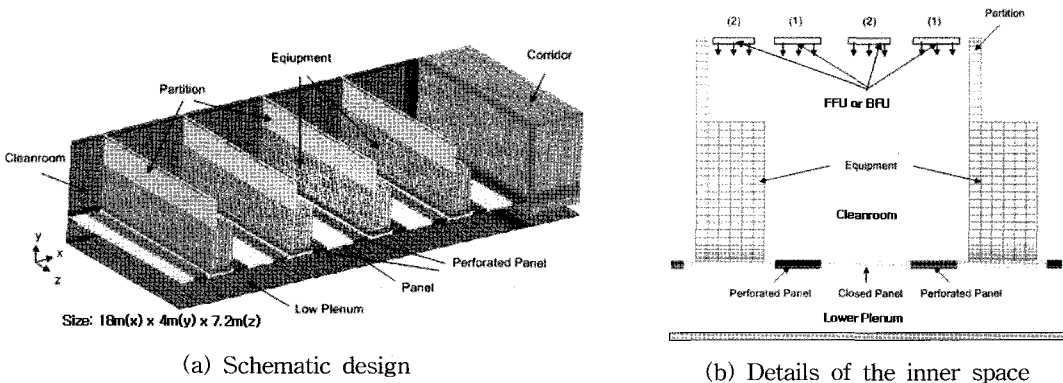


Fig. 1 Cleanroom layout of Class 1,000.

대상으로 모델을 구성하였다. Fig. 1(a)에서 보는 바와 같이 FFU 클린룸은 높이방향으로 클린룸(3.0 m), 하부플레넘(0.6m와 1.0 m)의 2부분으로 나누어지고 대한 그 외 복도(corridor), FFU 또는 BFU, 파티션(partition) 등으로 구성되며, 클린룸 내부에서 우수한 기류분포를 형성시키기 위하여 클린룸 바닥에 패널과 그 하부에 댐퍼가 설치된 것으로 모델링되었다. 급기는 외기와 순환공기가 혼합된 형태로 상부에서 토출되고 배기는 하부플레넘의 우측부($x = 18.0$ m)로 이루어지는 구조로 되어 있다. Fig. 1(b)는 클린룸 내부 공간에서의 상세도를 보여준다. 본 연구에서는 클린룸을 설비물의 유무에 따라 준공상태(as-built state)와 비운전상태(at-rest state)로 나누어서 해석을 수행하였다. 그리고 배치된 필터의 크기는 1.2 m(L) × 0.6 m(W)이고, 배치구조는 4개로 구분되고 상부에 x와 z방향으로 균일하게 위치한다. 장비의 크기는 0.9 m(L) × 1.8 m(H)이고 장비사이의 간격은 2.7 m이다. 하부에 설치된 패널은 전면이 다공패널(perforated panel)로서 압력강하의 제어가 이루어지지 않은 경우와 그림에서 보는 바와 같이 일부만이 다공패널로 이루어져 압력강하가 제어된 경우, 장비와 장비사이의 패널하부에 배기

구가 위치한 경우(case 8)에 대해 연구를 수행하였다. 이에 대한 사항은 Table 1에 자세히 나와 있다.

3. 클린룸 평가지표

기존의 클린룸에 대한 수치적 연구에서는 평가지표로 비균일도(non-uniformity, NU), 편향각(deflection angle, θ), 환기효율(ventilation effectiveness) 등의 기류분포 특성이 사용되었다.^(3,7) 비균일도는 일방향성 유동(unidirectional flow)의 클린룸에서만 사용되기 때문에 본 연구에서는 제외한다. 편향각은 클린룸 프로세스영역에서 기류의 편평도(air parallelism)로서 클린룸 바닥으로부터 1.5 m 위에서 측정된다. 편향각도 일방향성 유동(unidirectional flow)의 클린룸에서만 사용되는 지표이기는 하지만 오염제어의 관점에서는 오염을 확산거동을 평가할 수 있기 때문에 이를 지표로 분석하였다. ISO 규격⁽¹⁰⁾에 따르면 교차오염을 방지하기 위하여 클린룸에서 14° 이내로 제한되고 있다. 본 연구에서는 $x = 0$ m인 $y-z$ 단면을 기준으로 편향각을 계산하였기 때문에 ISO 기준을 만족시키기 위해서는 편향각이 $-14^\circ \sim 14^\circ$ 의 범위에 있으면 된다.

Table 1 Numerical cases conducted with different conditions

| Case | Occupancy state | Pressure drop control | Partition | Filter arrangement | Remark |
|------|-----------------|-----------------------|---------------|--------------------|--|
| 1 | as-built | no | not installed | 2 × 9*, (2)** | |
| 2 | as-built | no | not installed | 2 × 9, (2) | Low plenum height is 0.6m |
| 3 | at-rest | yes | installed | 3 × 9, (1)** | |
| 4 | at-rest | yes | installed | 3 × 9, (1) | Low plenum height is 0.6m |
| 5 | at-rest | no | not installed | 2 × 9, (1) | |
| 6 | at-rest | yes | not installed | 2 × 9, (1) | |
| 7 | at-rest | yes | installed | 2 × 9, (1) | |
| 8 | at-rest | yes | installed | 2 × 9, (1) | exhaust systems are under the each right side damper |
| 9 | at-rest | yes | installed | 2 × 5, (1) | BFU installed |
| 10 | at-rest | yes | installed | 3 × 5, (1) | |
| 11 | at-rest | yes | installed | 3 × 9, (1) | |
| 12 | at-rest | yes | not installed | 3 × 9, (2) | |

* 2 × 9 : Filter arrangement matrix on the plane of $x-z$ at $y = 4.0$ m,

** (1) : Filters are installed at positions (1) in Fig. 1(b).

** (2) : Filters are installed at positions (2) in Fig. 1(b).

4. 수치해석

4.1 지배방정식과 경계조건

클린룸에서의 유동특성을 기술하는 지배방정식은 연속방정식, 운동량방정식, 난류운동에너지방정식, 난류운동에너지 소산율방정식이며, 이러한 방정식을 수식으로 표현하면 Table 2와 같다. 본 연구에서는 클린룸 해석에서 많이 사용되는 표준 k-ε 난류모델을 사용하였으며, 각 식들에서의 기호선정은 일반적인 예를 따랐다.⁽¹²⁾

Fig. 1(a)에서 보는 바와 같이 클린룸의 형상이 좌측면(x = 0 m)과 전면(z = 7.0 m), 후면(z = 0 m)을 중심으로 대칭형상이기 때문에 이 부분들은 대칭경계조건으로 처리하였다. 본 연구에서 Class 1,000 클린룸은 환기회수가 시간당 60회인 것으로 모델링되었다. 본 연구에서 지배방정식과 함께 사용된 경계조건의 상세한 내용은 Table 3에 나열하였다. 그리고 클린룸 상부의 필터, 하부의 패널, 냉각코일, 댐퍼에서의 압력강하량은 Darcy's law를 이용한 식 (1)을 이용하여 계산하였고⁽¹¹⁾ 이때 사용된 계수값들은 참고문헌^(3,13,14)을 근거로 하였다.

$$-K_i u_i = \frac{\partial P}{\partial x_i}, \quad K_i = \alpha_i |u_i| + \beta_i \quad (1)$$

클린룸 바닥패널은 다공도(porosity)로 모델링하였

고 사용된 값은 이전의 연구⁽³⁾를 바탕으로 설정하였다.

4.2 수치해석방법

본 연구에서는 Table 2에 나열된 지배방정식을 풀기 위하여 상용 CFD코드인 STAR-CD⁽¹¹⁾를 사용하였다. 지배방정식의 대류항을 수치적으로 계산하기 위해서 2차의 상류차분도식(2nd-order upwind differencing scheme)을 사용하였고 SIMPLE 알고리즘을 사용하였다.⁽¹¹⁾ 계산시 수렴판정 조건으로는 입구에서의 운동량으로 정규화한 각 셀(cell)에서의 운동량 유수의 합과 연속방정식에서 유수의 합이 모두 10⁻³이하일 때로 정하였다. 계산 격자수는 약 420,000개로 비균일격자계가 사용되었고 수렴성을 평가하기 위하여 격자 간격을 1/2배로 하였을 때의 결과와 비교하였을 때 그 차이는 무시할 만하였다.

Table 3 Boundary conditions applying at the calculation domains

| | |
|--------|---|
| Inlet | $u_m = 0.267 \sim 0.8 \text{ m/s}, k_{in} = \frac{3}{2} (u_m \cdot I)^2,$ $\varepsilon_{in} = C_\mu \frac{3}{4} k^{\frac{3}{2}} / l$ |
| Outlet | $\frac{\partial u}{\partial x} = 0, \frac{\partial k}{\partial x} = 0, \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = 0$ |
| Wall | $u = v = w = 0, \frac{\partial k}{\partial x} = \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial k}{\partial z} = 0,$ where, $I = 0.1, l = 0.5 \times D_h$ |

Table 2 Governing equations and model coefficients

Continuity equation :

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0$$

Momentum equation :

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right\} + S_i$$

Turbulent kinetic energy equation :

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \left(\mu + \mu \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} + G_k - \rho \varepsilon$$

Dissipation rate equation of Turbulent kinetic energy :

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \left(\mu + \mu \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right\} + G_\varepsilon C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$

where,

$$C_\mu = 0.09, C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92, \mu_t = \frac{c_\mu \rho k^2}{\varepsilon}, G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

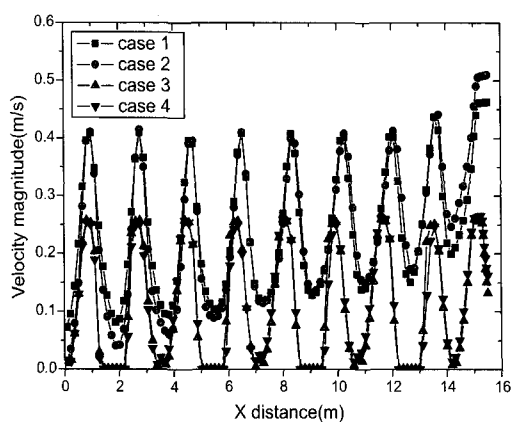
$$\sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 0.9, \sigma_l = 1.0$$

5. 결과 및 고찰

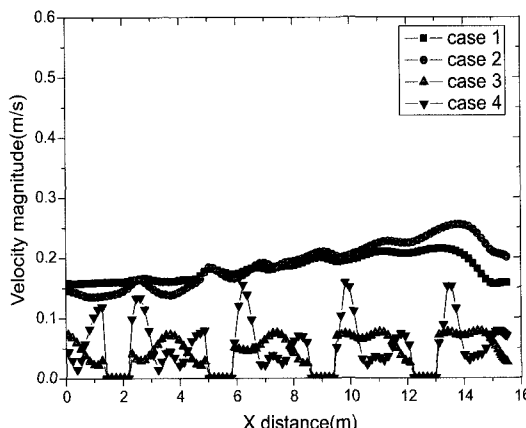
5.1 설비물의 유무

Fig. 2와 Fig. 3은 Table 1에 나와 있는 case 1~4에 대한 x축에 따른 속도분포와 편향각을 보여주고 있다. 그림에서 속도가 0인 부분은 장비가 위치한 곳이다. 필터가 설치된 하부에서의 속도분포와 편향각은 case 1과 2, case 3과 4에서 하부플레넘의 높이에 따라 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 준공상태(as-built state)인 경우에는 x가 증가할수록 속도가 조금씩 증가하는 것을 볼 수 있으나 비운전 상태(at-rest state)인 경우에는 x의 증가와 상관없이 속도가 유사한 값으로 나타났다. 그리고 편향각

은 x축을 따라 속도가 작아지는 영역을 제외한 대부분의 위치에서 ISO 규격을 만족시키는 것으로 나타났다. 그러나 필터가 배열되지 않은 위치에서의 속도분포와 편향각은 하부플레넘의 높이와 설비물의 유무에 따라 값의 차이를 보였다. 준공상태의 경우 속도분포와 편향각은 하부플레넘의 높이에 따라 큰 차이를 보이지 않고 있으나 편향각이 ISO 규격을 초과하고 속도벡터의 방향이 위를 향하는 것으로 나타났다. 이는 필터사이의 공간에서 순환영역이 존재하고 심한 편류가 발생하는 것을 의미한다. 비운전 상태인 경우에는 하부플레넘의 높이에 따라 속도 및 편향각이 다르게 나타났다. x축을 따라 형성되는 속도분포는 하부플레넘의 높이가 1.0m인 case 3이 0.6m인 case 4보다 균일한 것으로 계산되었으나 편향각

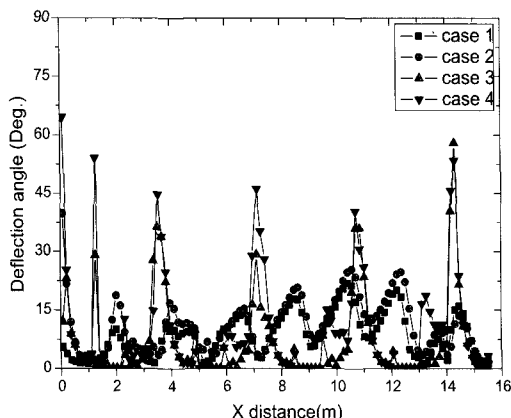


(a) under filters installed

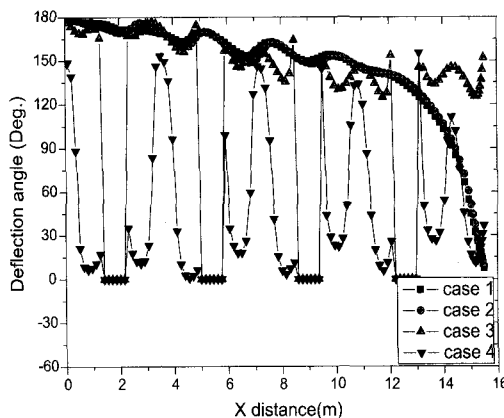


(b) under filters not installed

Fig. 2 Velocity profiles with x distance in case of 1 to 4.



(a) under filters installed



(b) under filters not installed

Fig. 3 Deflection angles with x distance in case of 1 to 4.

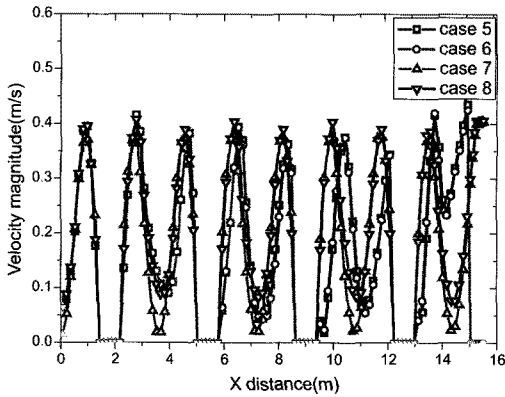
은 두 가지 경우 ISO 규격을 잘 만족시키지 않는 것으로 나타났다. 이는 하부플레넘의 높이가 낮을수록 클린룸 내에서 차압이 고르게 분포하는 경향을 갖고 필터사이의 공간에서 낮은 유속에 의한 결과라고 판단된다.

5.2 배기부의 구조와 파티션의 유무

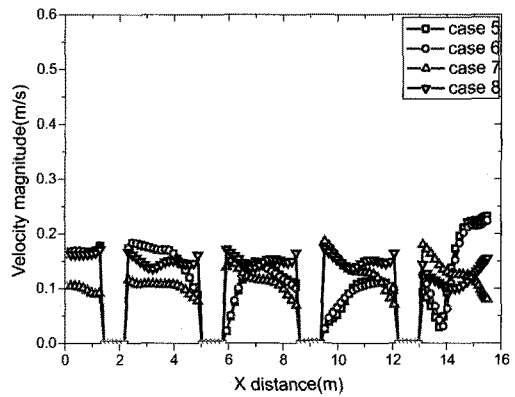
Fig. 4와 Fig. 5는 배기구의 구조와 파티션의 유무에 따른 속도분포와 편향각을 보여주고 있다. 필터가 설치된 x-y단면에서의 속도분포와 편향각은 파티션의 유무에 따라 결과가 크게 달라지는 것으로 나타났다. 파티션이 설치되지 않은 case 5와 case 6의 경우에는 $x > 13\text{m}$ 인 영역에서 속도가 증가하는 것

으로 나타났고 편향각은 x 가 증가함에 따라 ISO 규격을 벗어나는 위치가 증가하는 것을 나타냈다. 그러나 파티션이 설치된 case 7과 case 8의 경우에는 배기구의 구조에 관계없이 속도분포와 편향각이 유사한 값을 나타내었다. 필터가 배열되지 않은 x-y 단면에서의 속도분포도 파티션이 설치된 경우가 설치되지 않은 경우보다 균일한 경향을 나타내었다. 그러나 편향각은 대부분의 위치에서 (+)값을 나타내어 유동이 상부를 향하고 있는 것으로 나타났다. 이는 앞절에서 설명한 바와 같이 필터사이의 영역에서 순환류가 발생하기 때문인 것으로 판단된다.

그리고 준공상태의 일방향성 클린룸에서 다공패널의 하부에 설치된 댐퍼가 적절하게 조절이 되어도 유동이 리턴덕트의 방향으로 쏠리는 현상^(3,14)이

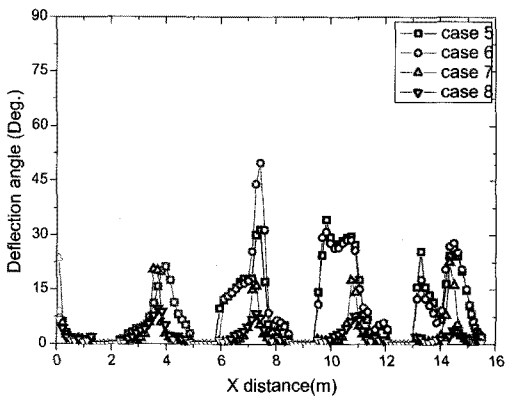


(a) under filters installed

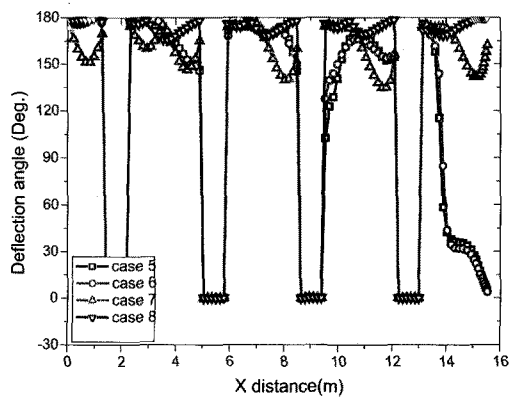


(b) under filters not installed

Fig. 4 Velocity profiles with x distance in case of 5 to 8.



(a) under filters installed



(b) under filters not installed

Fig. 5 Deflection angles with x distance in case of 5 to 8.

나타나는 것과는 달리 장비가 설치되고 장비와 천장 사이에 파티션이 설치되면 이들이 유동의 편향을 막는 역할을 하여 유속과 편향각은 균일해지고 장비와 장비사이에서 유사한 형태로 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

5.3 필터의 배치

Fig. 6과 Fig. 7은 Table 1에 나와 있는 필터의 배치에 따른 속도분포와 편향각을 보여주고 있다. 필터가 설치된 x-y단면에서의 속도분포와 편향각은 천장에 설치된 필터의 배치에 따라 결과가 크게 달라지는 것으로 나타났다. 천장에 2×5의 배열로 BFU가 설치된 경우(case 9)에는 유속의 편차가 상당히 크게 나타났고 3×5 또는 3×9 배열로 FFU가

설치된 경우에는 0.1~0.125 m/s를 평균으로 균일한 유속분포를 나타내었다. 파티션이 없이 장비의 상부에 FFU가 설치된 경우(case 12)에는 장비의 우측면에서 장비를 따라 흐르는 유동이 발생하는 것을 볼 수 있으며 이는 오염이 x가 증가하는 방향으로 전파되어갈 수 있음을 의미한다. 편향각은 필터의 개수가 작을수록 유속이 빨라지고 이로 인하여 순환기류가 억제되어 많은 위치에서 ISO 규격을 만족하는 것으로 나타났다. 그러나 장비의 상부에 FFU가 설치된 경우(case 12)에는 대부분의 위치에서 ISO 규격을 초과하였다. 이러한 결과로부터 장비의 상부에는 필터를 설치하지 않는 것이 좋을 것으로 판단된다. 그리고 case 9~case 11의 경우 장비의 좌우측면에서 편향각이 크게 나타나는데 이는 이부분에서 유속이 매우 작은 것에 기인한 결과이

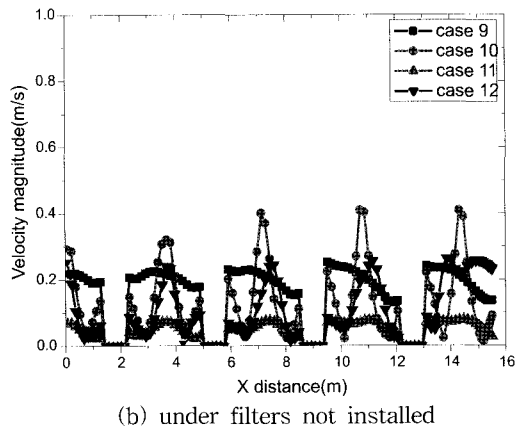
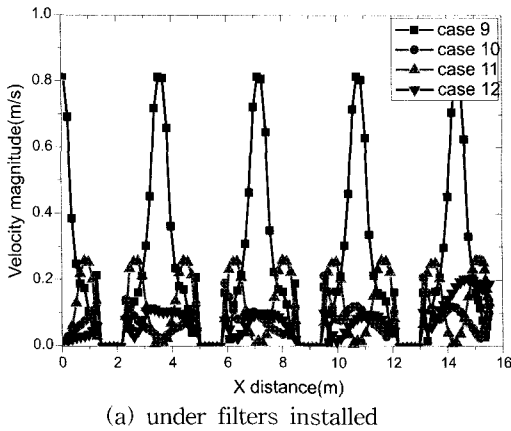


Fig. 6 Velocity profiles with x distance in case of 9 to 12.

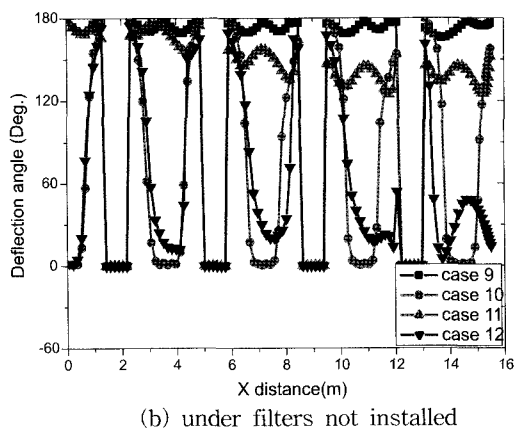
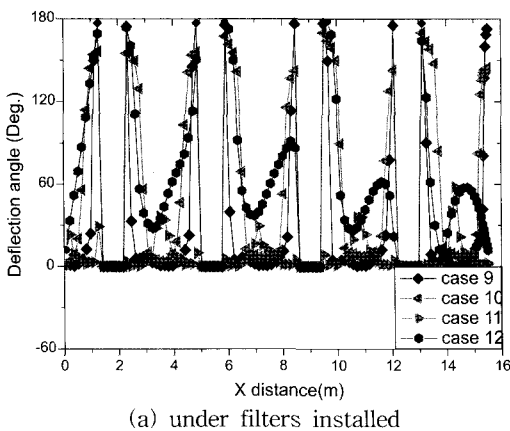


Fig. 7 Deflection angles with x distance in case of 9 to 12.

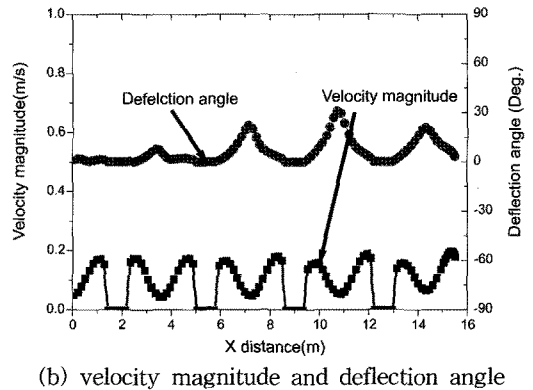
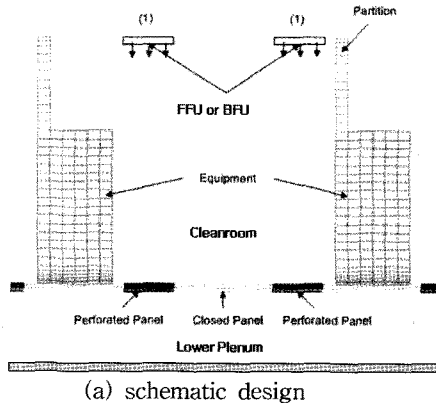


Fig. 8 Suggested model for improving airflow deflection in cleanroom of Class 1,000.

다. 필터가 배열되지 않은 x-y단면에서의 속도분포와 편향각을 살펴보면 2×5의 배열로 BFU가 설치된 경우에는 이 단면에서 강한 순환기류가 형성되고 있음을 확인할 수 있고 case 10과 case 12에서는 장비근처에서는 상승기류가 나타나고 장비와 장비의 사이에서는 하강기류가 형성되고 있음을 보여주고 있다.

또한 Fig. 6과 case 7의 결과는 장비를 따라 필터가 연속적으로 설치되지 않은 경우에는 필터가 설치되지 않은 하단에서 순환영역이 존재하여 오염제어에 지대한 영향을 미칠 것으로 판단된다. 따라서 Class 1,000의 클린룸에서 기류의 편향을 개선하기 위해서는 Fig. 8(a)와 같이 장비와 천장 사이에 파티션과 같은 차단막을 만들고 장비의 좌우측면을 따라 필터를 연속적으로 배치하며 Fig. 1(b)와 같은 구조에서 리턴덕트와 가까이 있는 다공패널의 압력강하량을 상대적으로 크게 제어하면 될 것으로 판단된다. Fig. 8(b)는 Fig. 8(a)와 같은 구조의 클린룸에서의 기류 분포와 편향각을 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 거의 모든 영역에서 균일한 기류분포가 확보되고 편향각이 ISO 규격(14°이내)을 만족하는 것을 확인할 수 있다.

6. 결 론

전산유체역학기법을 이용하여 Class 1,000 클린룸에서 장비 유무에 따른 점유상태, 필터와 다공패널의 배치, 하부플레넘의 높이 등을 변수로 하고 평가지표로서 편향각과 기류 균일도를 사용하여 편류 개선에 대한 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론

을 얻을 수 있었다.

- (1) 필터가 설치된 하부에서의 속도분포와 편향각은 하부플레넘의 높이에 따라 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 그러나 필터가 배열되지 않은 위치에서의 속도분포와 편향각은 하부플레넘의 높이와 설비물의 유무에 따라 값의 차이를 보였다.
- (2) 천장과 장비 사이에 파티션이 설치되면 이들이 유동의 편향을 막는 역할을 하여 유속과 편향각은 균일해지고 장비와 장비사이에 유사한 형태로 나타나는 것을 확인할 수 있었다.
- (3) 클린룸에서 필터는 장비의 상부보다는 장비 측면의 상부에 배치하는 오염제어 유리하다.
- (4) Class 1,000의 클린룸에서 장비와 천장 사이에 파티션을 설치하고 장비의 좌우측면을 따라 필터를 연속적으로 배치하며 리턴덕트와 가까이 있는 다공패널의 압력강하량을 상대적으로 크게 제어하면 기류의 편향을 개선하는데 유리할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Kim, K. Y., 1995, Next Generation Cleanroom Technology and Air Quality Control, Magazine of the Society of Air-Conditioning and Refrigeration, Vol. 24, No. 1, pp. 33-43.
2. Oh, M. D., 2002, A Trend of GIGA Level Cleanroom Technology, International Symposium on Clean Technology and Management for

- Indoor Air, Korea Air Cleaning Association, pp. 17-62
3. Noh, K. C., Oh, M. D. and Lee, S. C., 2004, A Study on the 3-D Airflow and Dynamic Cross Contamination Characteristics in the Photolithography Process Cleanroom, *J. of KSME*, Vol. 38, No. 5, pp. 560-568.
 4. Yang, H. C., Oh, M. D. and Lee, C. S., 1987, Study on the Characteristic of the Air flow and Particle Diffusion in the Cleanroom, *Proceedings of the SAREK 1987 Winter Annual Conference*, pp. 60-65.
 5. Oh, M. D., Lim, H. G. and Bae, G. N., 1990, Study on the Transient Cross Contamination of Contaminated Particles in the Turbulent Flow Field of the Cleanroom, *J. of KSME*, Vol. 38, No. 4, pp. 563-570.
 6. Chang, Y. C., 1998, Study on the Thermal and Fluid Characteristic in the Cleanroom, *Society of Air-Conditioning and Refrigeration-Lecture on the Industrial equipments*, pp. 43-55.
 7. Hu, S. C. and Chuah, Y. K., 2003, Deterministic Simulation and Assessment of Air-recirculation Performance of Unidirectional-flow Cleanrooms that Incorporate Age of Air Concept, *Building and Environment*, Vol. 38, No. 4, pp. 563-570.
 8. Jancoski, C. A. and Sinclair, J. D., 1997, High Isolation Minienvironment for Process Involving Toxic Substances, *Proceedings-Institute of Environmental Sciences*, pp. 117-121.
 9. Hu, S. C., Chuah, Y. K. and Yen, M. C., 2002, Design and evaluation of a minienvironment for semiconductor manufacture process, *Building and Environment*, Vol. 37, pp. 201-208.
 10. ISO 14644-1, 1999, Cleanrooms and associated controlled environments-Part 1 : Classification of air cleanliness, ISO, Geneva.
 11. Computational Dynamics Ltd., 2002, STAR-CD Version 3.15 User Manual, Computational Dynamics Ltd.
 12. Patankar, S. V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere, Washington, DC.
 13. Pui, Y. H., 2000, Filter Pleating Designs, *International Symposium on Air Cleaning Technology*, Korea Air Cleaning Association, part 3, pp. 1-47.
 14. Cheng, M., Liu, G. R., Lam, K. Y., Aci, W. j. and Lee, E. L., 1999, Approaches for improving airflow uniformity in unidirectional flow cleanrooms, *Building and Environment*, Vol. 34, pp. 275-284.